

## **5.10. Дослідження газодинамічних параметрів у герметичній кабіні за умови аварійного покидання серійного РПЛ у повітрі**

Для забезпечення відповідності вимогам ОСТ 100453-82 [334] під час аварійного покидання екіпажем РПЛ було розроблено і встановлено систему аварійного покидання в повітрі (САП). Склад і умови роботи САП наведено в додатку на період випробувань до КЛЕ [352].

### **5.10.1. Відкриття клапана аварійного зниження тиску повітря в герметичній кабіні**

Основні параметри клапану аварійного зниження тиску в ГК і кришки (дверей) без приводів наведено на рис. 5.16 – 5.19 [357]. САП призначено для аварійного покидання серійного літака в повітрі за умови проведення пред'явницьких випробувань. Зниження тиску повітря в ГК здійснюють шляхом відкриття клапана аварійного скидання на максимальний кут  $20^{\circ}$  (рис. 5.16). Перевірку працездатності САП було виконано в прямолінійному горизонтальному польоті зі швидкістю  $\sim 350$  км/год.

За допомогою САП підтримується необхідний надлишковий тиск у ГК літака до висоти польоту  $H = 12200$  м. Випробування з аварійного покидання літака на крейсерській висоті польоту пов'язані з певною складністю проведення випробувань і ризиком для життя людей. Тому випробування було проведено на висоті  $H \approx 4087$  м. Для цієї висоти польоту літака було здійснено газодинамічний розрахунок зміни тиску повітря в ГК за умови відкриття аварійного клапана. Зіставивши результати розрахунку і експерименту, за необхідності уточнюють встановлену залежність і проводять газодинамічні розрахунки зміни тиску повітря в ГК.

Слід враховувати, що кожна ГК характеризується індивідуальними властивостями процесів течії газу. Тому необхідно уточнити (налаштувати) теоретичне рівняння ГК на досліджуваній висоті польоту. На підставі такого рівняння можна виконувати газодинамічні дослідження процесів на висотах, які

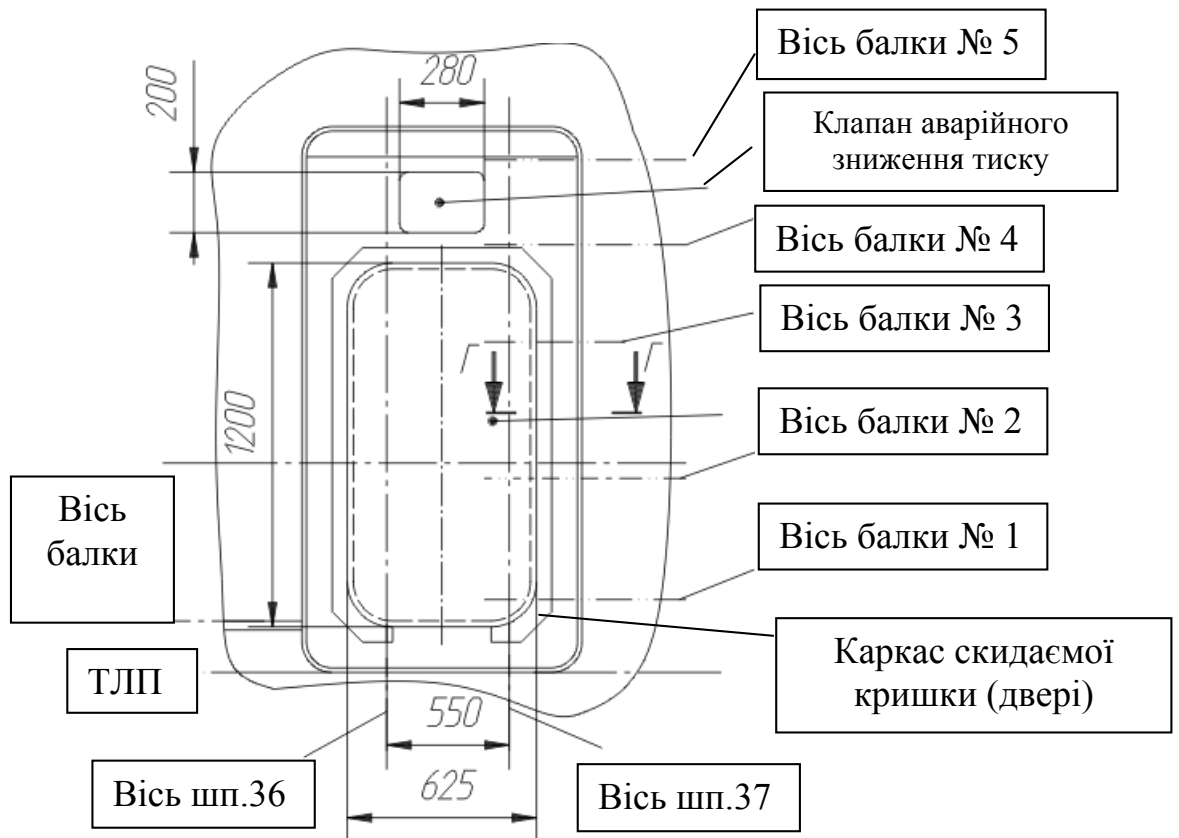


Рисунок 5.16. Вид зсередини на лівий борт РПЛ системи аварійного покидання в повітрі

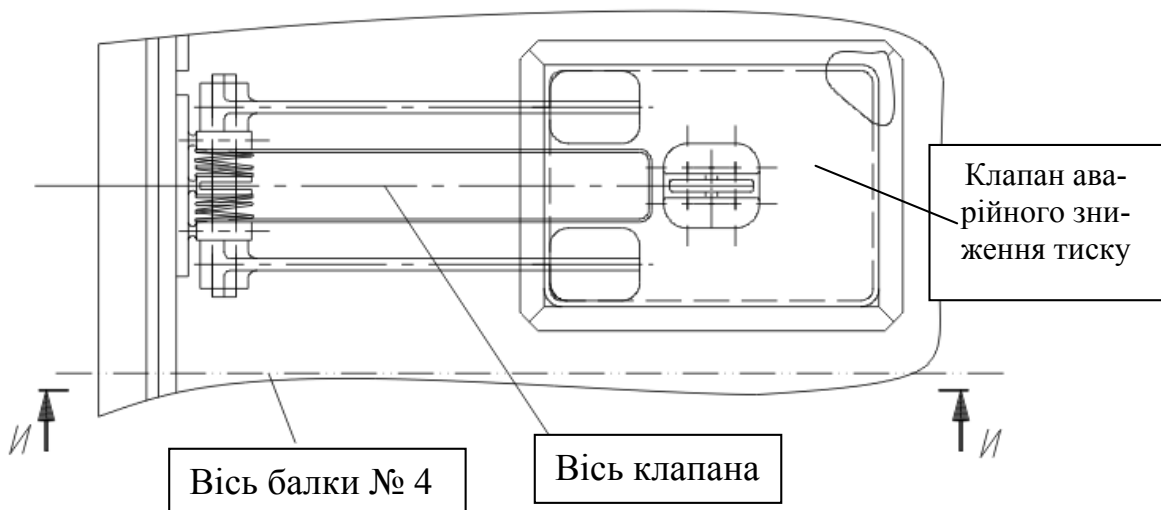


Рисунок 5.17. Вид зсередини на клапан аварійного зниження тиску

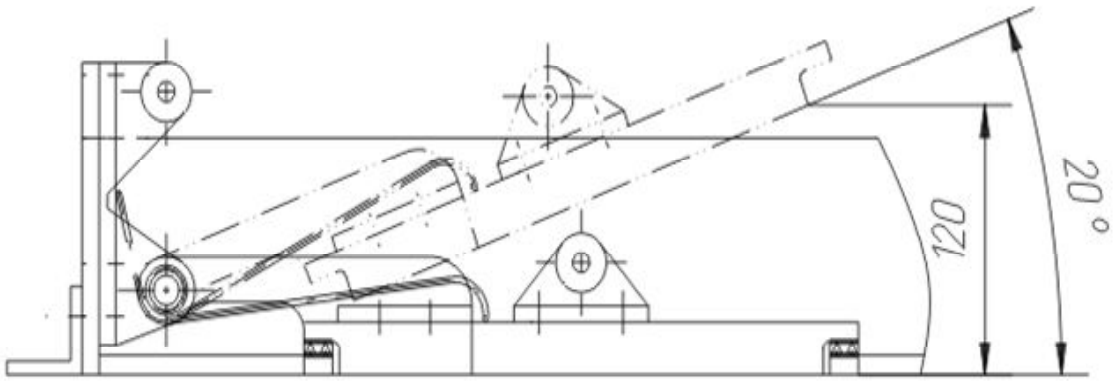


Рисунок 5.18. Переріз И-И з рис. 5.17

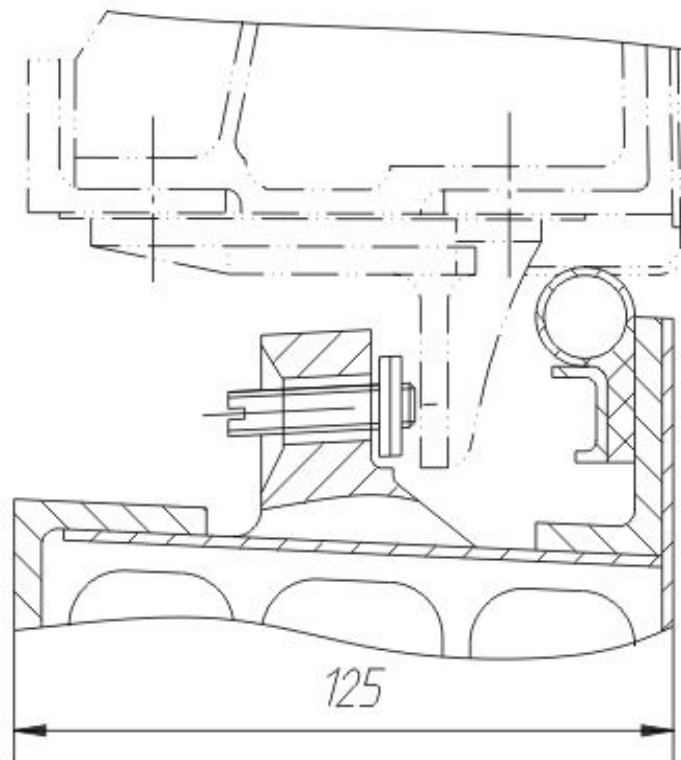


Рисунок 5.19. Переріз Г-Г з рис.5.16

можуть безпосередньо впливати на життєдіяльність людей.

Розглянемо особливості встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічних процесів реальної ГК з використанням показника політропи [308, 318]. Проведемо оцінювання рівняння відповідно до типової методики визначення адекватності моделі [78, 282]. Як функцію відгуку для розрахункових і експериментальних значень використовуватимемо значення тиску повітря в ГК. Похибка розрахунку у всьому дослідженому діапазоні тисків не перевищує 3,8 % для  $n = 0,2$ , 0,22% для  $n = 0,4875$ , 8,8% для  $n = 2$  (рис. П.1). Максимальне значення похибки отримано 6,7 % для  $n = 0,2$  і 15,6 % для  $n = 2$ . Отже, в діапазоні досліджених показників політропи  $n = (0,2 \dots 2)$  розрахункові значення тисків газу в ГК задовольняють вимоги інженерних розрахунків (похибка не повинна перевищувати (20 ... 30)%). Відповідно до робіт [78, 195, 200] отримані залежності задовольняють статистичні критерії і адекватно описують реальний процес.

Подальші дослідження рівняння показують, що визначення адекватності рівняння за тиском і використання такого рівняння для визначення часу аварійної розгерметизації недостатньо повно відображають всі вимоги, які висунуто до даного класу задач у разі оцінювання аварійної розгерметизації ЛА.

Визначимо оптимальну залежність, тобто рівняння і його параметри, яке задовольняє статистичні критерії з урахуванням вимог щодо зміни тиску і часу аварійної розгерметизації ГК. Для забезпечення вимог відповідно до [334] необхідно визначати час аварійної розгерметизації. Проведемо аналіз впливу показника політропи на результати розрахунку часу розгерметизації ГК. У процесі зменшення тиску повітря в ГК від початкового до 90 кПа похибка часу аварійної розгерметизації становить 57 % (збільшення часу) для  $n = 0,2$  і 50% (зменшення часу) для  $n = 2$ . Зі зниженням кінцевого тиску в ГК похибка розрахункового значення часу розгерметизації збільшується і при тиску 80 кПа становить 64 % (зменшення часу) для  $n = 2$ . Величина похибки розрахунку часу аварійної розгерметизації стає неприйнятною для інженерних розрахунків. Аналіз залежності зміни тиску в ГК відповідно до рис. П.1 показує, що за умови аварійної

розгерметизації зі зниженням тиску в ГК спостерігається загальна тенденція до збільшення похибки розрахунку часу аварійної розгерметизації. Тому розв'язання задачі з вибору рівняння, яке б описувала реальний процес витікання газу з ГК з достатньою для практики точністю, є одним із головних завдань. Для даного класу задач в опублікованих роботах [40, 41] відсутні рекомендації щодо вибору адекватної рівняння визначення часу аварійної розгерметизації і опис реального процесу витікання повітря з ГК.

Визначимо час аварійної розгерметизації ГК за допомогою рівняння для політропного процесу. У найзагальнішому вигляді алгоритм з вибору оптимального показника політропи, який задовольняє статистичні критерії, наведено на рис. П. 2. Пошук показника політропи проводять числовим методом. Проводять розрахунок параметрів повітря у відсіку і зіставляють розрахункове значення тиску повітря з експериментальним за різних показників політропи. Як критерій для вибору оптимального показника політропи використовують мінімум дисперсії:  $\min(\sigma_j^2) = \min\left(\sum_{i=1}^N \Delta P_j^2 / N\right)$ , де:  $\Delta P_i = P_{pij} - P_i$ ;  $P_{pij}$  – розрахункове значення тиску повітря в ГК для  $i$ -го дослідження за заданого  $j$ -го значення показника політропи;  $P_i$  – експериментальне значення тиску повітря в ГК для  $i$ -го дослідження;  $N$  – кількість експериментальних даних.

Розглянемо графік функції  $\sigma_j^2 = f(n)$  за умови відкриття аварійного клапана на висоті  $H = 4087$  м, який наведено на рис. П. 3. Проведемо дослідження функції в інтервалі значень показників політропи  $0 \leq n \leq 2,1$ . Функція в інтервалі  $0,11 \leq n \leq 2,1$  є безперервною і увігнутою. В ділянці значень  $n < 0,11$  отримати значення функції  $\sigma_j^2 = f(n)$  неможливо, адже система диференціальних рівнянь для визначення зміни тиску повітря в ГК не має розв'язку. Графік функції має мінімальне значення дисперсії ( $\min(\sigma_j^2) = 48228 \text{ Па}^2$ ) за показника політропи  $n = 0,4875$ . За умови збільшення показника політропи в інтервалі  $0,11 \leq n < 0,4875$  функція  $\sigma_j^2 = f(n)$  монотонно спадає, а в ділянці  $n > 0,4875$  – монотонно збільшується. В ділянці значень показника

політропи менше  $\min(\sigma_j^2)$  графік досліджуваної функції має більше значення приросту функції у разі зміни політропи, ніж в ділянці  $n > 0,4875$ . В ділянці  $n \geq 1$  похідна функції має лінійну залежність і дорівнює  $d(\sigma_j^2)/dn \approx 55,892 \text{ кПа}^2$ .

Функція  $\sigma_j^2 = f(n)$  не має симетрії щодо вертикальної осі з центром у точці  $n = 0,4875$ . Тому вибір оптимального показника політропи проведено з використанням одного з перешкодостійких методів [201]. У результаті розрахунку визначено показник політропи, який дорівнює  $n \approx 0,487$ . Застосування перешкодостійкого методу не привело до істотних змін розрахунку показника політропи. Однією з переваг використаного методу є те, що отримані результати розрахунку з оптимальним показником політропи мають незміщені оцінки. Про це свідчать такі ознаки. За інших рівних умов розрахункові значення тиску повітря відносно рівномірно розташовані з двох боків відносно вертикальної осі з початком координат у точці  $X = 0$  (рис. П.4). Графік кривих в ділянці додатних і від'ємних відхилень розрахункових значень тиску повітря щодо експериментальних симетрично розташовані відносно вертикальної осі з початком  $X = 0$ . Максимальна похибка розрахунку параметрів газу у відсіку відповідно до рівняння і оптимальним показником політропи не перевищує 0,4 %. Один із характерних прикладів зміщення результатів розрахунку наведено на рис. П.5 за значення показника політропи  $n = 1$ . Зміщення значень дисперсії в бік від'ємних відхилень розрахункових значень щодо експериментальних свідчить про нерівномірність розподілу розрахункових значень тиску газу у відсіку і зміщення практично всіх результатів розрахунку в ділянку низького тиску.

На результати розрахунку газодинамічних процесів у ГК за умови відкривання клапана аварійного скидання впливають такі основні параметри вимірювального тракту на літаку:

1. Графік залежності експериментальних тисків повітря від часу має відносно плавну характеристику. На характер кривої впливає частота опитування регулятора тиску, яка становить 4 Гц. На РПЛ датчик тиску фірми LIEBHERR розташований у регуляторі тиску, в ГК.

2. Швидкість зміни тиску повітря в ГК ( $dP/d\tau = -(2920...4920) \text{ Па/с}$ ) перевищує (за абсолютним значенням) максимальну швидкість застосовуваного в експерименті датчика тиску ( $dP/d\tau = -510 \text{ Па/с}$ ).

Аналіз контрольованих параметрів і свідчення використовуваного на літаку обладнання свідчать, що вимірюваний датчиком тиск повітря за умови відкриття клапана аварійного скидання знаходиться в діапазоні робочої ділянки. Отже, цей параметр не впливає на результати експериментальних даних і розрахунків. Для зменшення впливу частоти опитування датчика тиску на результати розрахунку параметрів газу наявне обладнання на борту літака дає змогу підвищити частоту опитування і таким чином підвищити точність вимірюваних параметрів.

Одним із параметрів, який істотно впливає на збільшення похибки вимірюваних величин, є швидкість зміни тиску повітря в ГК. Визначення швидкості зміни тиску повітря проводять на підставі показань датчика тиску в ділянці його лінійної характеристики. Граничне значення зміни тиску повітря на датчику визначає максимальна швидкість.

Проведено порівняльний аналіз вимірювання тиску газу в ГК літака РПЛ на висоті польоту  $H = 2500$  м датчика тиску фірми LIEBHERR і датчика БРС-1С (додаток Р). Для визначення швидкості зміни тиску на висоті  $H = 4087$  м необхідно збільшити робочий діапазон визначення швидкості зміни тиску в ГК більш ніж в (5,7 ... 9,6) разу в порівнянні з наявним діапазоном на літаку з використанням датчиків тиску фірми LIEBHERR. За умови відкриття клапана аварійного скидання вимірювальний тракт на літаку має давати змогу визначати швидкість зміни тиску в ГК в діапазоні більш ніж  $\pm 4,92 \text{ кПа/с}$ .

Для забезпечення вимог ГОСТ 100453-82 [334] проведено газодинамічні розрахунки на підставі отриманого рівняння з оптимальним показником політропи за умови відкриття клапана аварійного зменшення тиску повітря в ГК РПЛ на висотах  $H = 11600$  м (рис. П.6) і  $H = 12200$  м (рис. П.7).

Відповідно до проведених газодинамічних розрахунків зміни тиску газу в ГК можна зробити такі висновки:

1. Час аварійної розгерметизації РПЛ на висоті польоту  $H = 11600$  м за умови зменшення надлишкового тиску в ГК з  $0,55 \times 10^5$  Па до  $0,02$  МПа і за відсутності подачі повітря від СКП становить  $\sim 19,2$  с.

2. Час аварійної розгерметизації РПЛ на висоті польоту  $H = 12200$  м за умови зменшення надлишкового тиску в ГК з  $0,57 \times 10^5$  Па до  $0,02$  МПа і за відсутності подачі повітря від СКП становить  $\sim 20,2$  с.

Отримані значення часу аварійної розгерметизації ГК не задовольняють вимоги відповідно до пункту 38 [334] (не більше 15 с). Були продовжені числові дослідження з пошуку рішень для забезпечення відповідності цим вимогам. У результаті проведених досліджень встановлено, що на висотах  $H \leq 9230$  м за умови відкриття клапана аварійного зниження і падіння тиску повітря в ГК від початкового тиску до перепаду тиску  $0,02$  мПа між ГК та атмосферою час аварійної розгерметизації задовольняє вимоги відповідно до [334] (рис . П. 8).

### 5.10.2. Скидання дверей у герметичній кабіні

Після відкриття клапана аварійного зниження тиску газу в ГК відбувається падіння тиску повітря, і за умови досягнення надлишкового тиску повітря нижче  $0,02$  мПа кришка (двері) примусово виштовхується з отвору на  $100$  мм (рис. П. 9), відділяється від фюзеляжу і безперешкодно відноситься атмосферним повітрям, що набігає на фюзеляж, за межі літака. У процесі скидання кришки в літакову реєстраційну систему надходить сигнал з датчика нескидуваної частини аварійного виходу про включення аварійного виходу на відкриття.

Члени екіпажу здійснюють безпечне аварійне покидання літака через аварійний вихід, змонтований в отворі задніх вхідних дверей. Вимірювання тиску повітря в ГК за умови скидання дверей проводять відповідно до типової методики і тим же датчиком тиску, що і за умови відкриття клапана аварійного зниження.

На підставі отриманих результатів вимірювання тиску газу у відсіку в часі було побудовано залежність  $P_i = f(\tau)$  (рис. П.9). Аналіз отриманої залежності  $P_i = f(\tau)$  показує, що в початковий момент відкриття дверей, коли утворюється зазор



між дверима і каркасом фюзеляжу, відбувається відносно плавне зменшення тиску повітря протягом  $\sim 0,19$  с зі швидкістю  $dP/d\tau = -3814 \text{ Па/с}$ . Подальше зменшення тиску повітря в ГК відбувається за відсутності в отворі дверей. Протягом  $0,06$  с у ГК відбувається різке зниження тиску газу з максимальною швидкістю  $dP_i/d\tau = -218,9 \text{ кПа/с}$ . Подальше зменшення тиску газу протягом  $0,25$  с відбувається зі швидкістю  $dP/d\tau = -13,2 \text{ кПа/с}$ . Через  $0,5$  с після початку розгерметизації зменшення тиску газу в ГК відбувається протягом  $2$  с із середньою швидкістю  $dP/d\tau = -490 \text{ Па/с}$ . Таким чином, унаслідок зміни режиму течії газу з ГК через зазор в атмосферу і через отвір у дверях безпосередньо в атмосферу швидкість зменшення тиску газу в ГК збільшується в  $\sim 58$  разів. Протягом  $\tau \approx 1$  с тиск повітря в ГК зменшується з  $P_i = 79620 \text{ Па}$  до  $P_i = 62040 \text{ Па}$ . Залежно від утворення прохідної площі і швидкості зменшення тиску газу можна виділити такі основні режими течії газу: 1-й режим – відкриття дверей і утворення зазору між дверима і каркасом фюзеляжу (швидкість зменшення тиску газу не перевищує  $\sim 3,8 \text{ кПа/с}$ ); 2-й режим – відділення дверей від фюзеляжу (максимальна швидкість зменшення тиску газу становить  $(218,9 \dots 13,2) \text{ кПа/с}$ ); 3-й режим – витікання газу з ГК в атмосферу за відсутності дверей (відносно плавне зменшення тиску газу в ГК з середньою швидкістю  $\sim 490 \text{ Па/с}$ ).

Визначимо основні параметри встановленої залежності для зміни тиску повітря в ГК за умови скидання дверей аналогічно до досліджень під час відкриття клапана аварійного зменшення тиску. Проведемо числові дослідження рівняння за зміни параметрів повітря в ГК за політропою з показником політропи в діапазоні  $0,2 \leq n \leq 10,8$  (рис. П. 10). Порівняння результатів розрахунку і експерименту показує, що за  $n \leq 2$  результати розрахунку зміни тиску повітря в ГК за часом зміщені в бік збільшення часу розгерметизації. Так, за тиску повітря в ГК  $P_i = 76000 \text{ Па}$  розрахунковий час аварійної розгерметизації ( $n = 0,2$ ) збільшується відносно експериментального на  $205 \%$ . Вплив показника політропи на результати розрахунку відносно експериментальних даних наведено на рис. П. 10. Аналіз графіка функції  $\sigma_j^2 = f(n)$  показує, що зі збільшенням показника політропи функція

безперервно зменшується. За значень  $n \geq 4$  функція монотонно спадає з середньою швидкістю  $d(\sigma_j^2)/d\tau \approx 92729 \text{ Па}^2/\text{с}$ . Збільшення показника політропи призводить до безперервного зменшення дисперсії. В ділянці малих значень показника політропи ( $n \leq 0,5$ ) маємо максимальну швидкість  $\sigma_j^2$ . У разі зменшення показника політропи спостерігається монотонне збільшення  $\sigma_j^2$ .

Для досліджуваного процесу за умови скидання кришки визначимо основні закономірності обчислення оптимального показника політропи за критерієм  $\min(\sigma_j^2)$ . В ділянці малих значень показника політропи (наприклад,  $n = 0,2$ ) розрахункові значення тиску повітря в ГК перевищують у всій ділянці вимірюваних величин експериментальні значення (рис. П. 11). Зміщення графіка залежності  $\alpha_j^2 = f(\Delta P_i)$  переважно в ділянці додатних значень показує, що розрахункові значення тиску повітря в ГК з показником політропи  $n = 0,2$  мають зміщені оцінки. Збільшення показника політропи дає змогу зменшити зміщення оцінок. Так за  $n = 10$  (рис. П. 12) на графіку залежності  $\alpha_j^2 = f(\Delta P_i)$  значення  $\Delta P_i$  розташовані в ділянці додатних і від'ємних значень. Явно виділяються максимальні значення дисперсії в ділянці додатних і від'ємних значень  $\Delta P_i$ . Аналіз відхилення розрахункових значень тиску повітря відносно експериментальних у процесі розгерметизації ГК в часі свідчить, що максимальні відхилення мають місце в початковий момент відкриття дверей ( $\tau \approx 0,19 \text{ с}$ ) і за умови повного відкриття дверей ( $\tau \geq 0,31 \text{ с}$ ).

Для цих моментів часу отримано максимальні відхилення розрахункових тисків повітря відносно експериментальних. Для показника політропи  $n = 0,2$  максимальної похибки розрахунку досягнуто в діапазоні  $\tau = (0,19 \dots 0,25) \text{ с}$ . У разі збільшення показника політропи до  $n = 11$  максимальні похибки розрахунку отримані переважно за  $\tau \approx 0,25 \text{ с}$ . З огляду на суперечливість впливу показника політропи на результати розрахунку, визначимо оптимальне значення показника політропи в залежності від площі відкриття дверей.

У початковий момент відкриття дверей протягом  $\tau = 0,19$  с витікання повітря з ГК можна розглядати як течію газу в зазорі. За  $\tau > 0,19$  с витікання повітря з ГК включає режим течії газу в зазорі. У разі відділення дверей від фюзеляжу витікання повітря відбувається через отвір у прорізі дверей у навколишній простір. Для розглянутих режимів течії газу досліджуємо встановлену залежність і визначимо параметри адекватної встановленої залежності.

Проведемо числові дослідження рівняння для початкового моменту відкриття дверей. Мінімальної розбіжності між результатами розрахунку і експерименту досягнуто за значення показника політропи  $n = 0,837$ . Максимальна дисперсія відхилення розрахункових значень тиску повітря відносно експериментальних не перевищує значення  $\alpha_j^2 = 0,334 \text{ Па}^2$ . Збільшення або зменшення показника політропи призводить до зміщення розрахункових значень тиску в бік їх зменшення або збільшення відповідно. Наприклад, за  $n = 1,4$  розрахункові значення тиску повітря в кабіні занижені відносно експериментальних даних з дисперсією  $\alpha_j^2 = 4,42 \times 10^4 \text{ Па}^2$ .

У разі відділення дверей від фюзеляжу проведено числові дослідження рівняння. Дослідження показали, що характер функції дисперсії від показника політропи зберігається і аналогічний раніше отриманих результатів. За інших рівних умов значення дисперсії нижче на (6 ... 16)% в порівнянні з дисперсією відповідно до рис. П. 10. Мінімальне значення дисперсії отримано для встановленої залежності з показником політропи  $n \approx 15$ . Подальше збільшення показника політропи призводить до спотворення результатів розрахунку в початковий період розгерметизації. Аналіз зміни дисперсії відповідно до рис. П. 13 для рівняння з оптимальними показниками політропи ( $n = 0,837$  за умови початкового відкриття дверей і  $n = 15$  у разі відділення дверей від фюзеляжу) показує, що максимальна похибка розрахунку отримана з дисперсією  $\alpha_j^2 = 4,113 \times 10^6 \text{ Па}^2$  за максимальної швидкості зміни тиску газу у відсіку. Розташування точок дисперсії на кривій переважно у від'ємній ділянці різниці значень тиску вказує на те, що збільшення показника політропи викликано, насамперед, значеннями тиску газу у відсіку за

максимальної швидкості зміни тиску. Підвищення точності розрахунку можливе за допомогою збільшення показника політропи і зміни структури рівняння. За максимальної швидкості зменшення тиску газу у відсіку результати розрахунку тиску газу у відсіку мають завищені значення. Підвищення точності розрахунку досягається за допомогою збільшення показника політропи. Отримане таким чином значення показника політропи, з одного боку, відображає особливості досліджуваного фізичного процесу, а з іншого боку – враховує неточності завдання початкових даних. Для багатьох практичних задач значення показника політропи залежить від досліджуваного фізичного процесу і неточності задавання площі вихідного отвору. На практиці за умови розгляду задач аварійної розгерметизації ЛА часто виникають певні складнощі щодо встановлення прохідної площі течії газу в зазорі між дверима і каркасом фюзеляжу. Відсутність достовірної інформації про параметри рухомого газу в зазорі суттєво впливає на результати моделювання. У найзагальнішому випадку витікання газу з відсіку являє собою відкриту термодинамічну систему. Встановити загальну кількість параметрів, які відображають основні властивості реального об'єкта, важко а в багатьох випадках неможливо. На підставі наведених параметрів і розробленої математичної моделі можна виконувати послідовно уточнення моделі і, таким чином, наблизитися до опису реального процесу в досліджуваному реальному відсіку.

Результати експерименту та розрахунку з оптимальними показниками політропи наведено на рис. П. 14. За умови розрахунку тиску газу у відсіку максимальна похибка розрахунку становить 3,1 %. Похибка розрахунку тиску газу у відсіку є прийнятною для інженерних розрахунків. В результаті зіставлення результатів розрахунку і експерименту можна зробити наступний висновок. На підставі розробленого рівняння та отриманих оптимальних значень показників політропи можна проводити розрахунки тиску газу у відсіку або для визначення часу аварійної розгерметизації при досягненні заданого тиску газу в відсіку. Встановлена залежність реально відображає газодинамічні процеси аварійної розгерметизації ЛА і може широко використовуватися для встановлення основних закономірностей зміни тиску газу у відсіку.